

Замрій М.А.
аспірант

**Вінницький національний
аграрний університет**

Zamrii M.
postgraduate student

**Vinnitsia National Agrarian
University**

УДК 631.837.3-66.095

DOI: 10.37128/2306-8744-2025-2-5

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ СУШІННЯ НАСІННЄВОЇ МАСИ ЛЮЦЕРНИ В НЕРУХОМОМУ ШАРІ

Сушіння насіннєвого матеріалу є одним із найважливіших технологічних процесів, що безпосередньо впливає на його посівні якості та енерговитрати виробництва. Енергія проростання і схожість насіння залежать насамперед від режимних параметрів сушіння, які потребують наукового обґрунтування. Тому дослідження закономірностей сушіння насіннєвої маси люцерни має важливе значення для визначення оптимальних технологічних режимів, зниження витрат енергії та забезпечення високої якості насіння.

Аналіз літературних джерел показав, що первинна насіннєва маса люцерни за структурою належить до групи капілярно-пористих колоїдних матеріалів. Крива сушіння таких матеріалів складається з двох характерних періодів: постійної та спадаючої швидкості. У першому випадку швидкість випаровування визначається інтенсивністю теплообміну з поверхні, а у другому – умовами перенесення вологи всередині частинок і співвідношенням форм її зв'язку з сухою речовиною. Для опису цього процесу використано емпіричні рівняння, параметри яких встановлювалися експериментально.

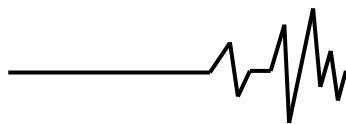
Проведені дослідження підтвердили, що швидкість сушіння залежить від температури та вологості теплоносія, пористості шару матеріалу та геометрії його складових. Встановлено, що зона інтенсивного сушіння становить 0,02–0,04 м, а зміна пористості безпосередньо впливає на ефективну поверхню тепло- і масообміну. Для опису процесу запропоновано використання критеріальних рівнянь із введенням безрозмірних параметрів, зокрема критерію Гукмана, що враховує термодинамічні властивості теплоносія.

Результати досліджень дозволили уточнити рівняння швидкості сушіння насіннєвої маси люцерни та надали можливість визначати критичний і рівноважний вологовміст матеріалу. Отримані залежності створюють підґрунтя для розробки математичної моделі процесу та дозволяють обґрунтувати оптимальні режими сушіння, що сприяють підвищенню енергоефективності та якості насіннєвого матеріалу.

Ключові слова: поживна суміш, сушіння, щільність, параметри, тепло- і масообмін, вологовміст, теплоємність, теплопровідність.

Постановка проблеми. Енергія проростання насіння та його схожість залежать, головним чином, від режимів процесу сушіння, які мають бути науково обґрунтовані. Тому для одержання насіння високої якості, з найменшими

енерговитратами та витратами коштів необхідно дослідити закономірності процесу сушіння поживної суміші люцерни залежно від режимних параметрів сушарки та теплоносія. Крім того, зазначені закономірності дають можливість



обґрунтувати технологію сушіння, керувати цим складним механізмом, визначати шляхи зниження енерговитрат, а також шляхи інтенсифікації процесу сушіння. У зв'язку з цим велике значення має теорія сушіння вологих матеріалів. Науковою базою сучасної теорії сушіння є такі науки, як теорія тепло- і масообміну, пневматика, гідравліка тощо. Тому визначення закономірностей процесу сушіння насіннєвої маси люцерни є актуальним завданням [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Залежно від співвідношення форм зв'язку вологи і сухої речовини усі матеріали поділяються на три групи: капілярно-пористі, колоїдні та капілярно-пористі колоїдні тіла [2]. Насіннєва маса люцерни, яка отримана під час збирання насінників без відділення листостеблової маси, має властивості, як капілярно-пористих, так і колоїдних матеріалів і відноситься до групи капілярно-пористих колоїдних матеріалів. Крива сушіння таких матеріалів має яскраво виражені два періоди: постійної та спадаючої швидкості сушіння.

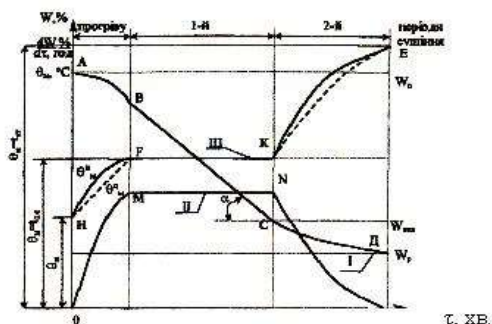


Рис. 1. Загальна схема процесу сушіння

У першому періоді швидкість сушіння не залежить від властивостей шару матеріалу [3, 4]. Це зумовлено тим, що випаровування вологи з поверхні частинок матеріалу в такому випадку відбувається як із вільної поверхні води. Рівняння кривої швидкості сушіння має вигляд:

$$-\frac{dw}{d\tau} = N_1 = \text{const}, \quad (1)$$

де N_1 – швидкість сушіння матеріалу в першому періоді, кг вологи/(кг абс. сухої речовини, год);

W – вологовміст матеріалу, кг/кг;

τ – час сушіння.

Починаючи з критичного вологовмісту, $W_{кр}$, швидкість сушіння поступово падає і залежить, як від умов теплообміну між потоком теплоносія і ефективною поверхнею шару (поверхнею, що омивається повітрям), так і від умов видалення вологи усередині окремих частинок матеріалу. На умови видалення вологи всередині частинок впливають співвідношення кількості вологи різних форм зв'язку з сухою

речовиною. При досягненні рівномірного вологовмісту – W_p , процес сушіння припиняється. Теоретично описати процеси, що відбуваються всередині окремих частинок шару матеріалу в другому періоді, поки що не є можливим. У зв'язку з цим більшість авторів [5, 6] при визначенні швидкості сушіння обмежувалися простими емпіричними рівняннями. Експериментальні дослідження процесу сушіння пожнивної суміші люцерни, отриманої під час збирання насінників, без відокремлення листостеблової маси показали, що криві сушіння цих матеріалів у другому періоді досить добре описується рівнянням вигляду:

$$-\frac{dw}{d\tau} = N_1 x' (W - W_p)^n \quad (2)$$

де x' – відносний коефіцієнт сушіння;

n – постійна, що характеризує властивості шару матеріалу;

W_p – рівноважний вологовміст матеріалу, кг вологи/кг абс. сухої речовини.

Рівняння (2) містить два коефіцієнти n і x' , що визначаються експериментально. Критичний вологовміст шару можна визначити за формулою:

$$W_{кр} = \left(\frac{1}{x'}\right)^{\frac{1}{n}} + W_p. \quad (3)$$

Швидкість сушіння в першому періоді залежить від режимних параметрів шару матеріалу та теплоносія. Пожнивна суміш люцерни складається з окремих бобів, частинок листя і стебел. З аеродинамічної точки зору її можна розглядати, як окремих пучок трубок, які обдуваються струменем теплоносія. Такі завдання вже досліджені [7] та їх вирішення можна застосувати для нашому випадку. Критеріальне рівняння для розрахунку коефіцієнта теплообміну між повітрям і пучком трубок має вигляд:

$$Nu = A' \cdot Re^{K'_1}, \quad (4)$$

де Re, Nu – критерії Рейнольдса і Нусельта;

A', K'_1 – постійні, що визначаються дослідним шляхом.

У критеріальному рівнянні теплообміну, ускладненому масообміном, що має місце в нашому випадку, необхідно ввести термодинамічний критерій Гукмана.

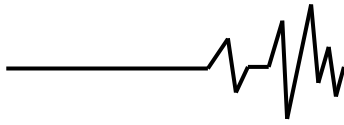
$$Gu = \frac{T_a - T_n}{T_a} \quad (5)$$

де T_a – температура повітря на вході в шар, К;

T_n – температура зволоженого термометра, К;

Мета дослідження. Підвищення ефективності сушіння насіннєвої маси люцерни шляхом розробки математичної моделі процесу в залежності від режимів сушіння.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження з сушіння



зразків досліджуваних матеріалів засвідчили, що зона сушіння, наприклад, вологої пожнивної суміші люцерни перебуває в межах 0,02...0,04 м. Під час руху через шар товщиною меншою зони сушіння теплоносії не встигає насичуватися до вологості 100%. У такому разі, за інших рівних умов, об'ємний коефіцієнт теплообміну змінюється зі зміною пористості шару. Викликано це тим, що зі зменшенням або збільшенням пористості відповідно збільшується або зменшується ефективна поверхня шару, отже, у критеріальному рівнянні (4) необхідно ввести безрозмірну величину у вигляді відношення вільного об'єму до об'єму всього шару:

$$\frac{V_n}{V_0} = m, \quad (6)$$

де m – коефіцієнт пористості шару.

У шарі товщиною більшою за зону сушіння, незалежно від коефіцієнта пористості та висоти шару, температура за сухим і зволоженням термометром, теплоносія, що проходить крізь шар, не змінюється, тому що у будь-якому разі відносна вологість повітря становить 97...98%. Звідси випливає, що об'ємний коефіцієнт теплообміну залежить від висоти шару. Тому в критеріальне рівняння (4) необхідно ввести симплекс у вигляді відношення (H/l) , де l – визначальний розмір шару. За визначальний розмір шару приймаємо довжину обтікання, що дорівнює половині довжини кола поперечного перерізу стебла;

$$l = \pi \frac{d_r}{2} \quad (7)$$

де d_r – середній радіус частинок, м.

Таким чином, критеріальне рівняння для визначення середнього по шару об'ємного коефіцієнта теплообміну в першому періоді сушіння матиме вигляд:

$$Nu'_v = \frac{\alpha_v \cdot l^2}{\lambda'_v} = A' Re_\varepsilon^{K'_1} Gu^{K'_2} - m^{K'_3} \quad (8)$$

де Nu'_v – видозмінений критерій Нуссельта;

Re_ε – еквівалентний критерій Рейнольдса;

α_v – об'ємний коефіцієнт теплообміну;

λ'_v – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/м °С

K'_2, K'_3 – постійні, які визначаються експериментально.

За аналогією рівняння для визначення середнього по шару об'ємного коефіцієнта масообміну для першого періоду сушіння матиме вигляд:

$$Nu'_v = \frac{\beta_v \cdot l^2}{\lambda_c} = B \cdot Re_\varepsilon^{K_1} Gu^{K_2} - \left(\frac{H}{l}\right)^{K_3}, \quad (9)$$

де Nu'_v – видозмінений критерій Нуссельта для об'ємного коефіцієнта масообміну;

λ_c – коефіцієнт масопровідності повітря, кг вологи /м.год.Па;

β_v – середній по шару коефіцієнт масообміну в першому періоді сушіння, кг вологи /м.год.Па.

Коефіцієнт масообміну, віднесений до різниці парціальних тисків, можна визначити зі співвідношення [8]:

$$\beta_v = \frac{p_n}{\Delta P} \cdot N_1, \quad (10)$$

де ΔP – середня різниця парціальних тисків біля поверхні матеріалу і в повітрі, н/м².

$$\Delta P = \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{2,3 \lg(\Delta P_1 / \Delta P_2)}, \quad (11)$$

У періоді постійної швидкості сушіння початкова різниця парціальних тисків ΔP_1 дорівнює різниці парціальних тисків адіабатично насиченого повітря, що надходить у шар.

$$\Delta P_1 = P_H - P_1 \quad (12)$$

Кінцева різниця парціальних тисків ΔP_2 дорівнює різниці парціальних тисків адіабатично насиченого і повітря, що покидає шар.

$$\Delta P_2 = P_H - P_2 \quad (13)$$

Еквівалентний критерій Рейнольдса знаходиться за відомим співвідношенням [9]:

$$Re_\varepsilon = \frac{V_{\text{шар}} \cdot l}{\nu} \quad (14)$$

$V_{\text{шар}}$ – швидкість повітряного потоку в шарі, м/с;

ν – кінематична в'язкість повітря, м²/с.

$$V_{\text{шар}} = \frac{V'_{\text{шар}} \rho_n}{\rho'_c}, \quad (15)$$

де $V'_{\text{шар}}$ – швидкість повітря на вході в шар, м/с;

ρ'_c, ρ_n – поточна і початкова густина повітря, кг/м³

Підставивши в (13) замість $V_{\text{шар}}$ і ν їхнє значення з (14) і (15), отримаємо.

$$Re_\varepsilon = \frac{V'_{\text{шар}} \cdot \rho_n \cdot l}{\mu \cdot g}, \quad (16)$$

де μ – динамічна в'язкість повітря, кг.с/м²;

g – гравітаційна константа, м/с²,

Розв'язуючи спільно рівняння (9) і (10), і підставивши замість нього значення з (16), отримаємо співвідношення для визначення середньої по шару швидкості сушіння досліджуваних матеріалів:

$$N_1 = B \left(\frac{V'_{\text{шар}} \cdot \rho_n \cdot l}{\mu \cdot g} \right)^{K_1} \cdot Gu^{K_2} \cdot \left(\frac{H}{l} \right)^{K_3} \left(\frac{\lambda_l \cdot \Delta P}{\rho_n \cdot l^2} \right), \quad (17)$$

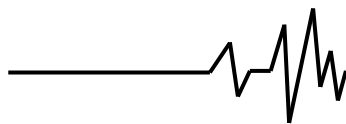
У виразі (17) ΔP можна замінити на початковий сушильний потенціал повітря, що характеризується різницею вологовмісту адіабатично насиченого повітря та повітря, що надходить у шар.

$$\Delta d_1 = d_H - d, \quad (18)$$

Як відомо, вираз для визначення парціального тиску пари вологого повітря має такий вигляд [10].

$$P = \frac{P_s \cdot d}{0,622 + d}, \quad (19)$$

де d – вологовміст повітря, кг /кг;



P_6 – тиск барометричний, Па.

При невеликих порівняно з 0,622 значеннях d , як, наприклад, у нашому випадку:

$$P \approx \frac{P_6}{0,622} \cdot d, \quad (20)$$

Тоді за аналогами

$$\Delta P \approx \frac{P_6}{0,622} \cdot \Delta d, \quad (21)$$

де Δd – середній сушильний потенціал повітря, кг /кг;

Оскільки швидкість сушіння шару в першому періоді, за інших рівних умов, постійна, то середній по шару сушильний потенціал повітря пропорційний початковому сушильному потенціалу Δd_1 . Тоді

$$\Delta P = Z_1 \cdot \Delta d_1 \quad (22)$$

Z_1 – коефіцієнт пропорційності,

Висота шару H , за всіх інших рівних умов, пропорційна навантаженню шару:

$$H = Z_2 \cdot P_c \quad (23)$$

де P_c – питоме навантаження матеріалу на сітку сушильної установки.

Підставивши в рівняння (17) данні ΔP і H з (22), (23), і провівши деякі перетворення отримаємо

$$N_1 = C \cdot V_{\text{пит}}^{K_1} \cdot G u^{K_2} \cdot P_c^{K_3} \cdot \Delta d_1^{K_4} \quad (24)$$

$$V_{\text{пит}} = \frac{3600 \cdot V_{\text{шп}}}{m} \cdot \rho_v \quad (25)$$

З урахуванням (24) рівняння (2), що описує процес сушіння досліджуваних матеріалів у другому періоді, набуде такого вигляду:

$$-\frac{dw}{dt} = C \cdot V_{\text{пит}}^{K_1} \cdot G u^{K_2} \cdot P_c^{K_3} \cdot \Delta d_1^{K_4} \cdot x(W - W_p)^n, \quad (26)$$

Висновки. Рівняння (26) дає змогу проаналізувати процес досушування досліджуваних матеріалів у щільному шарі залежно від масової швидкості, температури і вологості теплоносія, питомого навантаження шару з урахуванням властивостей матеріалу, як об'єкта сушіння, визначити оптимальний режим сушіння матеріалу.

Список використаних джерел

1. Солон О.В., Замрій М.А. Дослідження процесу сушіння насінників трав. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. №3 (106). С. 78-87.

2. Котов Б. І., Спірін А. В., Калініченко Р. А. Тепло - і масообмін при сушінні сільськогосподарських рослинних матеріалів у щільному нерухомому шарі. - С. 41-44. / ТЕТ АПК. 2016, №2 (94). С. 41 – 44.

3. Determination of the dependence of the physico-mechanical properties of alfalfa seed pods on moisture content / O. Solona et al. *Technology audit and production reserves*. 2025. Vol. 3, no. 3(83). P. 84–90.

4. Котов. Б.І., Кузьменко В.Ф. Математична модель динаміки сушіння листостеблових матеріалів активним вентиляванням // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету – 2013. №13. С. 32 – 38.

5. Kaletnik H., Yaropud V., Polievoda Yu., Solona O., Babyn I., Tverdokhlib I. Study of the process of active-ventilation drying of legume grasses' fractional processing products. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2024. Vol. 100 (2). P. 156–163.

6. Солодка А.В. Дослідження теплообміну в нерухомому шарі гранульованого матеріалу / Холодильна техніка та технологія, 53(4). 2017. С. 12 – 16.

7. Spirin A., Kupchuk I., Tverdokhlib I., Polievoda Y., Kovalova K., Dmytrenko V. Substantiation of modes of drying alfalfa pulp by active ventilation in a laboratory electric dryer. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2022. 98 (5). pp. 11–15. doi:10.15199/48.2022.05.02

8. Kaletnik H., Yaropud V., Kupchuk I., Aliiev E., Babyn I., Lavreniuk P. Modeling of the technological process of walnut drying in a convective dryer. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99, № 12. P. 91–97.

9. Котов Б.І. Аналіз тенденцій підвищення паливно-енергетичної ефективності зерносушарок. *Зб. Н. праць Кіровоградського державного технічного університету*. 2001. Вип. 10.- С.227-232.

10. Development and research of energy-efficient helio-air collectors for drying agricultural products / B. Kotov et al. *Technology audit and production reserves*. 2024. Vol. 6, no. 1(80). P. 54–60.

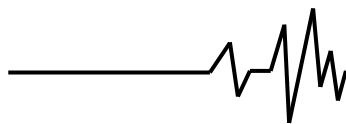
References

1. Solona, O. V., & Zamrii, M. A. (2022). Doslidzhennia protsesu sushinnia nasinnykiv trav [Research of the drying process of grass seed plants]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, 3(106), 78–87. [in Ukrainian].

2. Kotov, B. I., Spirin, A. V., & Kalinichenko, R. A. (2016). Teplo- i masoobmin pry sushinni silskohospodarskykh roslynnykh materialiv u shchilnomu nerukhomomu shari [Heat and mass transfer during drying of agricultural plant materials in a dense fixed bed]. *TET APK*, 2(94), 41–44. [in Ukrainian].

3. Solona, O., et al. (2025). Determination of the dependence of the physico-mechanical properties of alfalfa seed pods on moisture content. *Technology Audit and Production Reserves*, 3(3[83]), 84–90. [in English].

4. Kotov, B. I., & Kuzmenko, V. F. (2013). Matematychna model dynamiky sushinnia lystosteblovykh materialiv aktyvnyym ventyliuvanniam [Mathematical model of the



dynamics of drying leaf-stem materials by active ventilation]. *Pratsi Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu*, 13, 32–38. [in Ukrainian].

5. Kaletnik, H., Yaropud, V., Polievoda, Yu., Solona, O., Babyn, I., & Tverdokhlib, I. (2024). Study of the process of active-ventilation drying of legume grasses' fractional processing products. *Przegląd Elektrotechniczny*, 100(2), 156–163. [in English].

6. Solodka, A. V. (2017). Doslidzhennia teploobminu v nerukhomomu shari hranulovanoho materialu [Study of heat transfer in a fixed bed of granular material]. *Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiia*, 53(4), 12–16. [in Ukrainian].

7. Spirin, A., Kupchuk, I., Tverdokhlib, I., Polievoda, Y., Kovalova, K., & Dmytrenko, V. (2022). Substantiation of modes of drying alfalfa pulp by active ventilation in a laboratory electric dryer. *Przegląd Elektrotechniczny*, 98(5), 11–15. <https://doi.org/10.15199/48.2022.05.02> [in English].

8. Kaletnik, H., Yaropud, V., Kupchuk, I., Aliiev, E., Babyn, I., & Lavreniuk, P. (2023). Modeling of the technological process of walnut drying in a convective dryer. *Przegląd Elektrotechniczny*, 99(12), 91–97. [in English].

9. Kotov B.I. Analysis of trends in improving the fuel and energy efficiency of grain dryers. *Coll. Proceedings of Kirovograd State Technical University*. 2001. Vyp. 10. P.227-232. [in Ukrainian].

10. Kotov, B., et al. (2024). Development and research of energy-efficient helio-air collectors for drying agricultural products. *Technology Audit and Production Reserves*, 6, 1(80), 54–60. [in English].

DETERMINATION OF THE DRYING RATE OF ALFALFA SEED MASS IN A FIXED BED

Drying of seed material is one of the most critical technological processes that directly affects its sowing qualities and the energy consumption of production. Germination energy and seed viability

primarily depend on the drying regime parameters, which require scientific justification. Therefore, the study of the drying behavior of alfalfa aftercrop mixture is of significant importance for determining optimal technological regimes, reducing energy costs, and ensuring high seed quality.

A review of the literature has shown that the alfalfa aftercrop mixture, in terms of structure, belongs to the group of capillary-porous colloidal materials. The drying curve of such materials consists of two characteristic periods: the constant-rate period and the falling-rate period. In the first case, the evaporation rate is determined by the intensity of heat transfer from the surface, while in the second case it depends on the conditions of internal moisture migration within the particles and the forms of its binding with dry matter. To describe this process, empirical equations were applied, with parameters determined experimentally.

The conducted studies confirmed that the drying rate depends on the temperature and humidity of the drying agent, the porosity of the material layer, and the geometry of its components. It was established that the zone of intensive drying is within 0.02–0.04 m, and that changes in porosity directly influence the effective surface area of heat and mass transfer. For the description of the process, the use of criterion equations with the introduction of dimensionless parameters was proposed, in particular the Hukman criterion, which accounts for the thermodynamic properties of the drying agent.

The research results made it possible to refine the drying rate equation for the alfalfa aftercrop mixture and to determine the critical and equilibrium moisture content of the material. The obtained dependencies provide a basis for the development of a mathematical model of the process and allow the justification of optimal drying regimes, which contribute to improving energy efficiency and seed material quality.

Keywords: aftercrop mixture, drying, density, parameters, heat and mass transfer, moisture content, heat capacity, thermal conductivity.

Відомості про автора

Замрій Михайло Анатолійович – здобувач наукового ступеня доктора філософії з галузевого машинобудування Вінницького національного аграрного університету. Службова адреса: м. Вінниця, вул. Сонячна 3, ВНАУ 21008, <https://orcid.org/0000-0002-9433-6714>).

Zamrii Mykhailo – recipient of the scientific degree of Doctor of Philosophy in the specialty 133 Industrial mechanical engineering Vinnytsia National Agrarian University. Office address: Vinnytsia, str. Sonyachna 3, VNAU 21008, <https://orcid.org/0000-0002-9433-6714>).